祁连山 MODIS *LST* 时空变化特征及影响因素分析①

邱丽莎[1,2,3]，何 毅[1,2,3]，张立峰[1,2,3]，王文辉[1,2,3]，唐源蔚[1,2,3]

（1 兰州交通大学测绘与地理信息学院，甘肃 兰州 730700；
2 地理国情监测技术应用国家地方联合工程研究中心，甘肃 兰州 730700；
3 甘肃省地理国情监测工程实验室，甘肃 兰州 730700）

摘 要：地表温度（Land Surface Temperature，*LST*）是研究区域尺度和全球尺度上地表能量和水平衡物理过程中不可缺少的参数。祁连山 *LST* 的时空变化规律及其影响因素模式未知。通过采用趋势分析法和相关性分析法，探讨 2000—2017 年间祁连山 *LST* 的时空变化特征及与植被的相互关系，分析各植被类型下地表温度的时空分异特征。结果表明：(1) MODIS *LST* 产品的精度能够满足祁连山地表温度时空变化分析的要求。(2) 祁连山 *LST* 时间序列呈“上升—下降—上升—下降”的波动变化，整体呈小幅上升趋势，以 0.17 ℃·(10 a)$^{-1}$ 的速率波动上升，冬季 *LST* 上升趋势最显著(63.37%)，变化率为 0.22℃·(10 a)$^{-1}$；空间上呈西北降低东南升高的变化趋势，显著上升面积(14.89%)远大于下降面积(0.90%)。(3) 祁连山年均 *LST* 与 *NDVI* 呈负相关，显著相关区域占 22.56%，夏季 *NDVI* 对 *LST* 的调控作用较显著(25.45%)；荒漠 *NDVI* 对 *LST* 的影响大于其他植被类型。(4) 海拔对各植被类型 *LST* 有强烈的影响，相关性依次为荒漠 > 林地 > 草甸 > 耕地；然而，夏季 *LST* 与海拔的相关性因植被覆盖增加而显著降低。(5) 祁连山 *LST* 上升是 *NDVI*、海拔以及植被类型综合影响的结果。

关 键 词： MODIS *LST* *NDVI*； ；
文章编号

地表温度（Land Surface Temperature，*LST*）是大气与地表结合部的温度状况[1]，是地表显热和潜通热量共同作用的结果[2]。*LST* 在区域尺度上的时空变化受植被覆盖特征，地表特性，地形，太阳辐射和气象条件等因素影响[3]。植被能够反映陆地生态系统对气候变化的响应，在水土保持、气候调节、生态系统稳定中发挥着重要作用[4]，植被类型及数量的变化将导致 *LST* 变化。植被分布的时空异质性对 *LST* 产生不尽相同的净效应，既可能产生增温效应，同时也会导致降温效应[2]。

2000 年以来中国年平均 *LST* 上升趋势显著，尤其是北方大部分地区增温明显[5]，但西北干旱半干旱地区的增温速率更为明显，其速率是湿润地区的 1.7 倍[6]，其中内蒙古、陕西经河西走廊至青海、青藏高原北部等地区的增温幅度远高于全国其他地区[7]。不同地区的增暖速率与其所处的生态环境，尤其是陆地植被覆盖状况密切相关[2]。大幅度增温现象多发生在植被稀少地区，并且增暖速率与植被覆盖度之间关系显著[8]。王明娜[9]发现在中国北方半干旱地区，植被覆盖增加现象对多年平均 *LST* 的影响呈现负效应。植被与 *LST* 之间联系显著，但不同的时空背景下，*LST* 对植被变化的敏感性差异较大[7]，不同的植被覆盖对太阳辐射的吸收，传导，反射存在差异性，由此构成了不同地理区域的地温格局[10]。

祁连山作为青藏高原与北部内陆荒漠地区的分

① **收稿日期：**2020-01-07； **修订日期：**2020-04-03
基金项目：甘肃省自然科学基金（17JR5RA095）；兰州交通大学天佑青年托举人才计划；甘肃省教育厅“兰州市主城区地面沉降 InSAR 监测”（2019A-043）资助
作者简介：邱丽莎（1993-），女，硕士研究生，研究方向为生态环境遥感监测. E-mail：lisa_qiu@lz.acmlife.org
通讯作者：张立峰（1982-），男，博士，副教授，研究方向为生态环境遥感监测. E-mail：119273207@qq.com

水岭,自然条件极不稳定,对气候变化和人类活动极为敏感[11]。近年来已有学者从气候演变规律,不同土地利用等方面出发进行了相关的研究。但针对祁连山 *LST* 时空变化特征及其对地形响应的研究较为欠缺,此外,不同植被类型对 *LST* 变化的影响有待讨论。因此,本文基于 2000—2017 年的 MODIS *LST* 数据和 MODIS *NDVI* 数据,结合植被类型数据,利用线性趋势法深入分析祁连山 *LST* 月、季节和年时间尺度上的时空特征,采用皮尔逊相关分析法探讨祁连山 *LST* 与海拔、植被类型等因素之间的相互关系。这对于了解西北干旱半干旱地区的地表能量交换,水热循环过程具有重要意义,且对祁连山生态环境修复,维持生态平衡等具有实际应用价值。

1 研究区概况

祁连山地处西北内陆干旱半干旱地区(图 1a),横跨甘肃、青海两省[12]。东起乌鞘岭,西至当金山口,北临河西走廊,南接柴达木盆地,是青藏、蒙新和黄土三大高原的分界线[13]。山势由西向东降低,由多条西北—东南走向的平行山脉和宽谷组成,全长约 1 000 km,宽 300 km[14]。绝大部分地区海拔在 3 500 ~ 5 000 m 左右,其中位于疏勒山的团结峰为最高山峰[11]。祁连山自然条件复杂,水热条件差异大,属于典型的大陆性气候,年均温在 0.6 ℃左右,年降水为 400 ~ 700 mm[15]。祁连山河流多以冰川融水补给为主,主要河流有党河、疏勒河、北大河、黑河、石羊河、大通河和湟水[16]。植被分布受大气环流和地势格局的共同作用呈独特的垂直地带性特征,海拔由低到高分布有荒漠草原、山地草原、山地森林草原、高山灌丛草甸、高寒草甸和高寒稀疏草甸(图 1b)[17]。

2 数据源与方法

2.1 数据源

本文所用遥感数据来源于美国国家航空航天局(NASA)提供的 2000—2017 年,时间分辨率为 8 d,空间分辨率为 1 km 的地表温度 MOD11A2 和植被覆盖 MOD13Q2 数据产品。利用 MODIS Reprojection Tool(MRT)软件对下载的 MODIS 数据进行拼接,投影转换等预处理工作,然后应用 ArcMap 软件对预处理后的数据进行裁剪,并基于最大合成法生成祁连山各月白天 *LST* 和月最大 *NDVI*。一般将 *NDVI* 达到 0.1 以上的区域定义为植被覆盖区。因此对 *NDVI* 数据进行裁剪,去除 $NDVI < 0.1$ 的裸土,沙漠、戈壁、水体、冰雪等无植被覆盖区[18],为与植被数据一致便于研究,对 *LST* 数据也做同样的裁剪处理。

气象数据来源于中国气象数据服务中心的月均温数据,涵盖祁连山及周边地区的 13 个气象站点,用于对 MODIS *LST* 产品的适用性检验。植被类型数据来源于 2000 年修订的 1:100 万植被类型图。

2.2 研究方法

2.2.1 线性趋势法 本文采用线性趋势法来模拟 18 a 间祁连山 *LST* 变化趋势,其中变化率 θ_{slope} 的计算公式为:

$$\theta_{slope} = \frac{n \times \sum_{i=1}^{n} i \times LST_i - \sum_{i=1}^{n} i \sum_{i=1}^{n} LST_i}{n \times \sum_{i=1}^{n} i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n} i\right)^2} \tag{1}$$

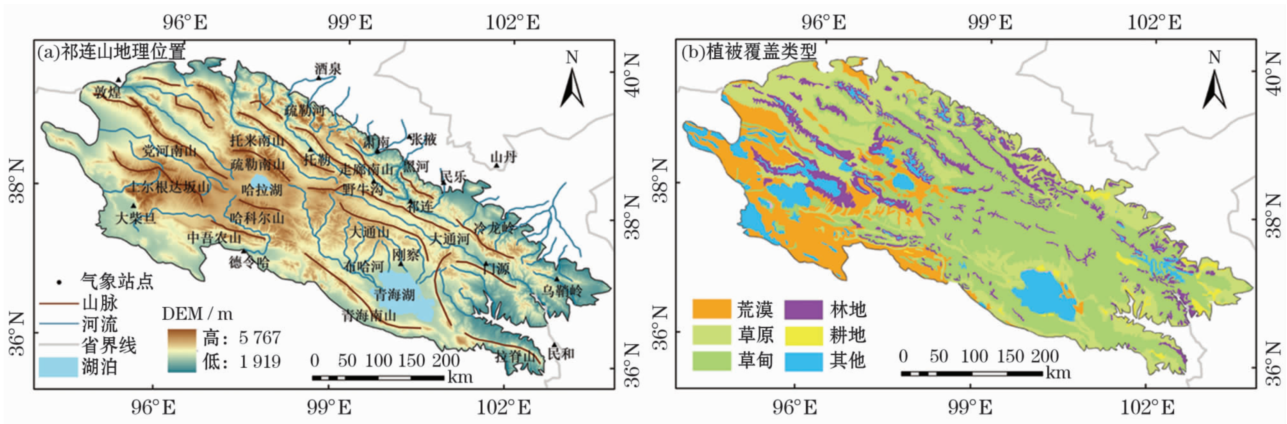


图 1 祁连山地理位置及植被覆盖类型

Fig. 1 Location and the types of vegetation cover of Qilian Mountains

式中：n 为研究时段的年数；LST_i 为第 i 年的 *LST*；θ_{slope}是变化率。$\theta_{slope}>0$ 说明 *LST* 在 n 年间呈增加的变化趋势，反之，则代表 *LST* 呈下降趋势[19]。在确定 *LST* 变化趋势的显著性水平时采用 F 检验法，并根据趋势线斜率的变化范围，定义了显著上升（$\theta_{slope}>0$，$P\leqslant 0.05$），不显著上升（$\theta_{slope}>0$，$P>0.05$），显著下降（$\theta_{slope}<0$，$P\leqslant 0.05$），不显著下降（$\theta_{slope}<0$，$P>0.05$）4 种变化趋势[20]。

2.2.2　**相关分析法**　采用 Pearson 线性相关系数法研究 *LST* 与植被海拔之间的关系，主要研究 *LST* 与 *NDVI* 及 DEM 的相关程度，相关系数取值在［－1，1］之间，相关系数绝对值越大，说明 *LST* 变化与影响因子之间的相关性越高，相关系数绝对值越低，则二者间相关性越小[21]。相关性计算公式为：

$$r=\frac{\sum_{i=1}^{n}(a_i-\bar{a})(b_i-\bar{b})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(a_i-\bar{a})^2\sum_{i=1}^{n}(b_i-\bar{b})^2}} \tag{2}$$

式中：n 为监测时段累计年数；a，b 分别为相关性分析的两个变量；$\bar{a}$，$\bar{b}$ 为变量的平均值。

3　结果与分析

3.1　MODIS *LST* 产品在祁连山的适用性

选取祁连山 13 个气象站点的月地温数据，基于 MODIS *LST* 数据逐月提取 2000—2017 年对应站点的 *LST*，使用 Pearson 相关分析法进行相关性检验。分析发现各气象站 *LST* 与 MODIS *LST* 具有较高的相关性，均通过了显著性检验（表 1，图 2）。表明 MODIS *LST* 产品在祁连山地区具有适用性。

3.2　祁连山 *LST* 时序分析

2000—2017 年祁连山年均 *LST* 以 0.17 ℃·(10 a)$^{-1}$ 的速率波动上升，多年平均 *LST* 为 17.93 ℃，最大 *LST* 和最小 *LST* 分别为 20.46 ℃（2013 年）和 12.73 ℃（2002 年）。不同时段上升速率有所不同，2000—2003 年、2003—2017 年 *LST* 上升速率分别为 1.83 ℃·(10 a)$^{-1}$ 和 0.14 ℃·(10 a)$^{-1}$，这与曹广超等[22]祁连山南坡具有 5 个气温周期（1964—1974 年、1974—1983 年、1983—1992 年、1992—2002 年、2002—2014 年）的研究结论一致。显然，祁连山 *LST* 在 2000—2002 年期间处于极低值水平，2003 年显著上升，达到平均水平，2004—2017 年间，祁连山 *LST* 呈"上升—下降—上升—下降"的波动趋势，整体呈小幅上升趋势（图 3a）。

祁连山春、夏、秋、冬四季 *LST* 上升速率分别为 0.08、0.21、0.18 ℃·(10 a)$^{-1}$ 和 0.22 ℃·(10 a)$^{-1}$，多年平均 *LST* 分别为 23.70、29.97、14.84 ℃ 和 3.21 ℃，最低值均出现在 2002 年。从上升速率来看，冬季上升速率最大，春季上升趋势最不显著，与商莎莎等[23]对西北地区气温变化研究结果及曹广超等[22]对祁连山四季平均气温倾斜率的研究结果具有一致性，认为冬季 *LST* 上升幅度对年均 *LST* 变化的影响最大[22]。春季 *LST* 存在 2000—2004 年［1.38 ℃·(10 a)$^{-1}$］和 2012—2014 年［5.39 ℃·(10 a)$^{-1}$］两个上升期，在 2014 年具有最大值27.37 ℃，其余年份变化不显著；秋季 *LST* 呈轻微上升趋势，在 2002—2006 年间显著上升，变化率为 2.95 ℃·(10 a)$^{-1}$，其余年份 *LST* 较为稳定，均在 14.84 ℃上下波动；夏季和冬季 *LST* 变化趋势一致，呈波动性上升，但冬季变化率略大于夏季（图 3b～3e）。

3.3　祁连山 *LST* 空间分布

祁连山 *LST* 总体呈东南高西北低的空间分布特征。具体表现为西北部高海拔山区 *LST* 较低，如哈科尔山、疏勒南山、走廊南山等地区，年均 *LST* 在 0 ℃以下的区域占总面积的0.19%。这些区域平均海拔在 5 000 m 以上，植被覆盖度较低，主要以高山植被和灌丛为主；而在中部的哈拉湖、土尔根达坂山、党河南山、托来山、大通山及东部的达坂山等中高海拔地区，*LST* 介于 0～15 ℃之间，占整个研究区的 60.45%；东部海拔 2 500 m左右的平原河谷地

表 1　祁连山各气象站实测月均温与 MODIS *LST* 相关性

Tab. 1　Correlation between monthly observed surface temperature and MODIS *LST*

气象站点	相关系数
托勒	0.921**
野牛沟	0.872**
门源	0.876**
祁连	0.858**
乌鞘岭	0.873**
酒泉	0.931**
冷湖	0.958**
大柴旦	0.970**
德令哈	0.959**
刚查	0.814**
西宁	0.971**
民和	0.931**
张掖	0.977**

注：* 为通过 $p<0.05$ 显著性检验；** 为通过 $p<0.01$ 显著性检验

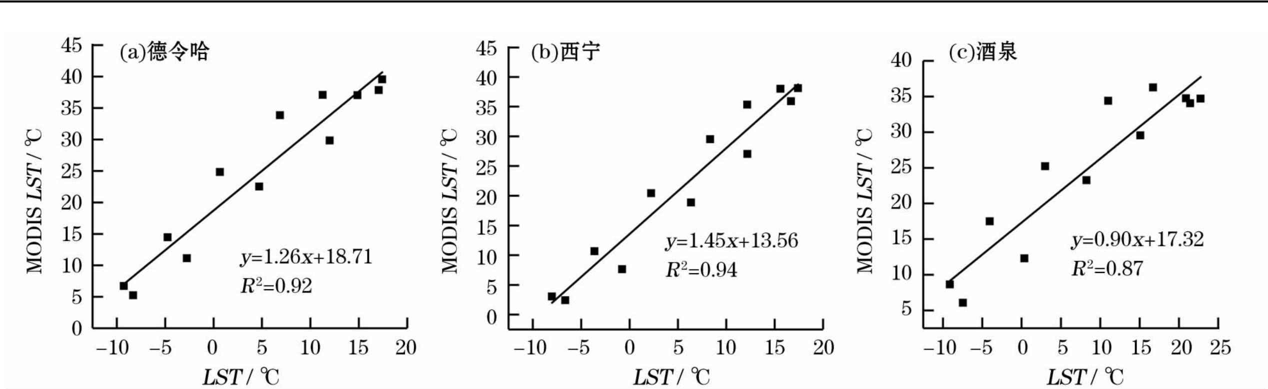


图 2 典型气象站实测月均温(*LST*)与 MODIS *LST* 的相关性

Fig. 2 Correlation between monthly observed surface temperature and MODIS *LST* on the typical weather stations

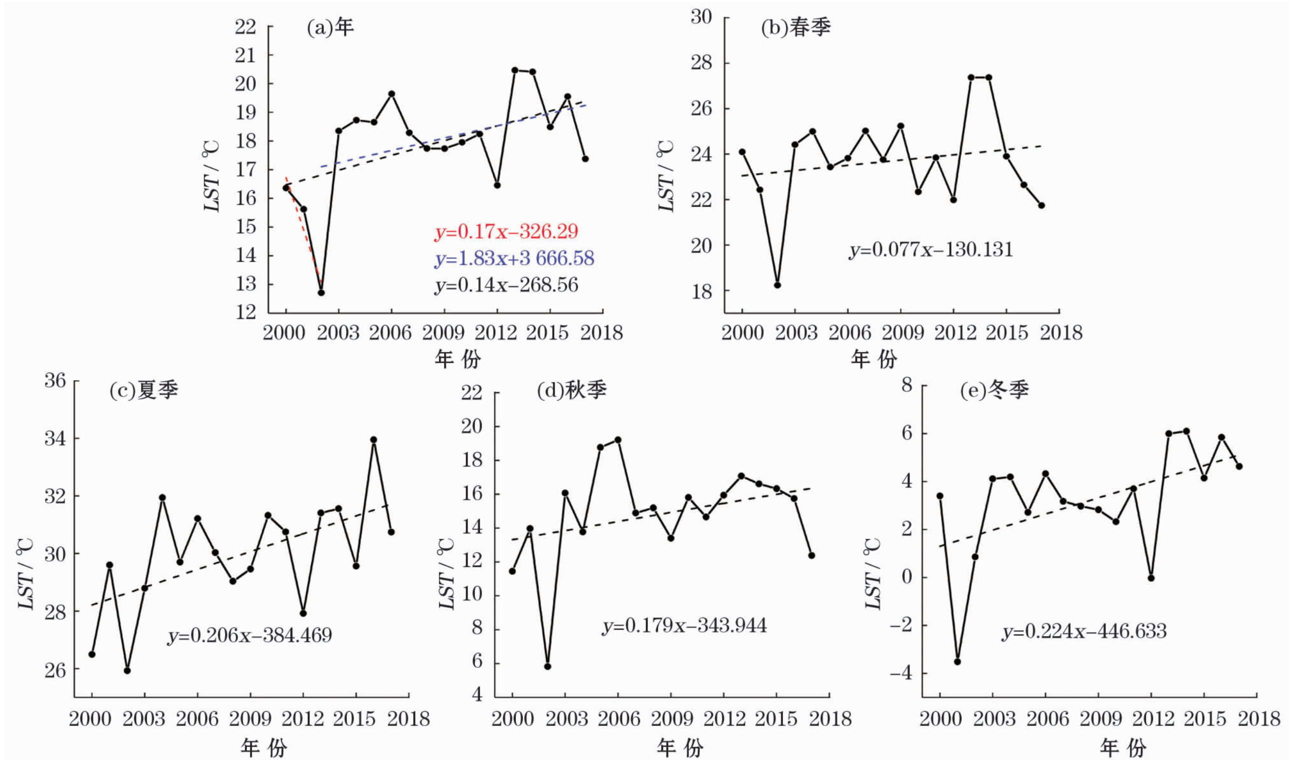


图 3 祁连山 2000—2017 年 *LST* 年均和季节变化

Fig. 3 Annual and seasonal variation of *LST* in Qilian Mountains during 2000 – 2017

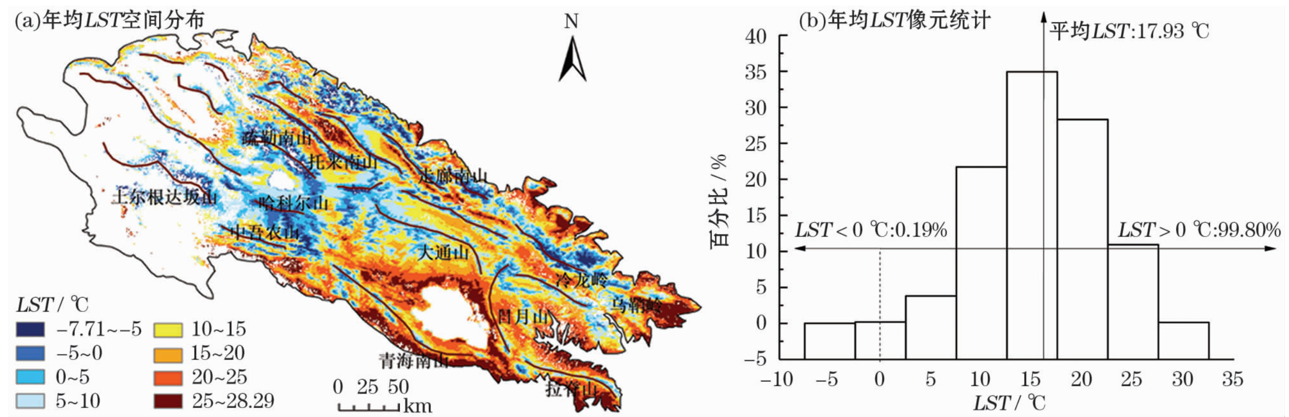


图 4 祁连山年 *LST* 空间分布及像元统计

Fig. 4 Spatial distribution and percentage statistics of the annual *LST* in Qilian Mountains

带，为 *LST* 在 15 ℃以上的高值区，年平均 *LST* 为 25.14 ℃，包括青海湖、大通河流域、黑河流域及南部的塔塔棱河等区域。这些区域是祁连山主要的人类聚居地，土地覆盖以耕地和建筑用地为主。因此，除自然因素外，人类活动也是影响这些区域 *LST* 分布的主要因子。

图 5 显示了 *LST* 的年内变化特征，祁连山 *LST* 年内高值期一般在 3～9 月。3 月，随着太阳高度角逐渐增大，祁连山气温逐渐回暖，沿托来山、大通山山脉，东西走向的河谷地区及青海湖地区，*LST* 最先上升，其后几个月，由东向西逐渐增温。7 月，祁连山 *LST* 达到全年最高(30.85 ℃)，91.05% 的研究区 *LST* 在 0 ℃以上，最高 *LST* 约为 44.2 ℃。从 9 月起，因受太阳辐射减少，日照时数缩短，植被覆盖度降低等条件的影响，祁连山中部 *LST* 开始下降。10 月～次年 2 月，*LST* 呈由东向西递减变化，整体处于低值水平，平均 *LST* 为 3.21 ℃，但在青海湖、乌鞘岭、拉脊山等区域仍然存在 *LST* 在 10 ℃以上的高值区，大面积的不透水面使热量难以及时散发[24]，同时，冬季人造热源也是这些区域 *LST* 较高的原因之一。

3.4 祁连山 *LST* 变化分析

祁连山年 *LST* 呈东南显著上升，西北轻微下降的变化趋势。上升和下降区域分别占 77.26% 和 22.74%，显著上升的区域为 14.89%，与曹广超等[22]对祁连山气候变化的研究结果一致。*LST* 显著上升区域主要分布在中吾农山、托来山、大通河、青海湖东部及西宁等地区，这些地区平均海拔多在 3 500 m 以下，虽处于高植被覆盖区，但近年来植被退化严重[25]，草甸、灌丛等植被覆盖度的变化引起蒸散发和地表反照率的显著变化，进而导致 *LST* 显著上升。*LST* 显著下降的区域仅占总面积的 0.9%，

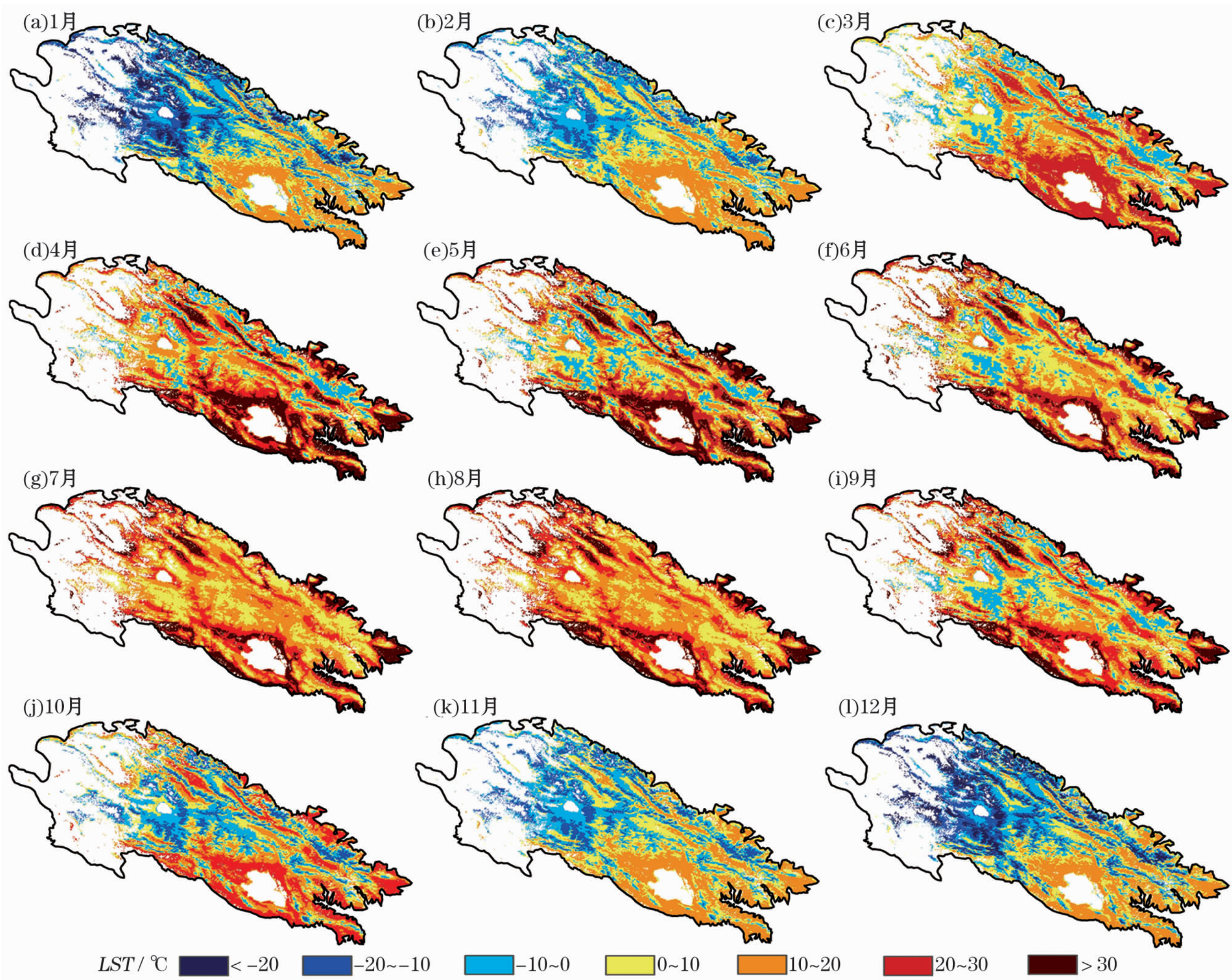


图 5 祁连山月平均 *LST* 空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of monthly *LST* in Qilian Mountains

表 2　2001—2017 年 *LST* 变化率百分比统计

Tab. 2　Statistics of *LST* change rate from 2001 to 2017

变化趋势	年均 /%	春季 /%	夏季 /%	秋季 /%	冬季 /%
极显著上升	14.89	3.19	14.27	33.87	63.37
上升趋势	62.37	57.97	56.73	59.13	34.86
下降趋势	21.85	36.97	27.83	6.83	1.74
极显著下降	0.90	1.87	1.17	0.17	0.03

集中在祁连山西北部，包括托来南山、哈科尔山、走廊南山及布哈河流域。

图 6 显示 *LST* 在四个季节均呈自西北向东南升高的趋势，但不同季节具有不同的分布特点。春季和冬季 *LST* 变化方向较为一致，青海湖和西宁盆地增温趋势尤为显著，证实了付建新等[26]青海南山以南的恰卜恰站升温速率最高的研究结果。冬季 *LST* 上升幅度最大，63.37% 的面积表现出极显著上升趋势。夏秋两季 *LST* 增温区域逐渐向西南扩张，疏勒南山、哈科尔山等 5 000 m 以上的高海拔地区 *LST* 明显升高。秋季 *LST* 上升区域占总面积的 93%，仅在布哈河和哈拉湖南部有小面积下降区域，极显著下降区域占 0.03%。祁连山 *LST* 上升区域在年内具有自低海拔向高海拔地区过渡的变化特征。

2000—2017 年间，祁连山 *LST* 总体呈微弱上升趋势，各植被覆盖类型 *LST* 均呈上升趋势，其中耕地 *LST* 变化率最大，年变化率为 0.10 ℃ · (10 a)$^{-1}$；其次为荒漠 *LST*〔0.09 ℃ · (10 a)$^{-1}$〕，草甸年均 *LST* 变化幅度最小，变化率为 0.08 ℃ · (10 a)$^{-1}$。在季节尺度上，祁连山各植被类型 *LST* 均在夏秋两季呈上升趋势，尤其是在秋季林地和草甸 *LST* 有较大幅度的增加趋势，变化率分别是 0.20 ℃ · (10 a)$^{-1}$ 和 0.18 ℃ · (10 a)$^{-1}$。但草甸和耕地 *LST* 分别在春季和冬季有轻微下降趋势。耕地 *LST* 显著上升说明耕地的增加可能会导致祁连山 *LST* 的进一步上升[27]。

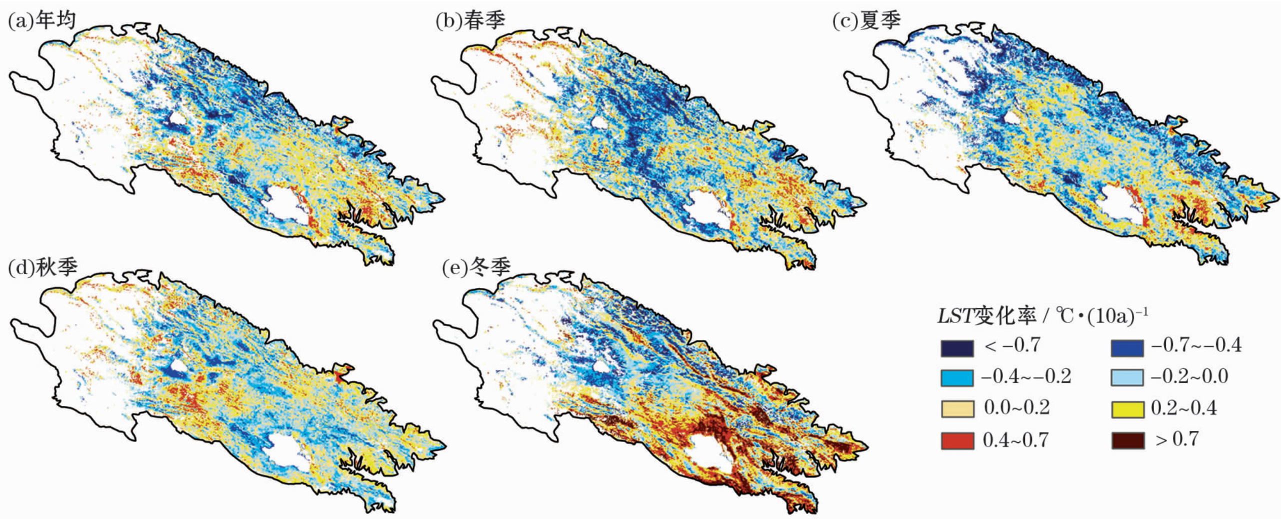


图 6　祁连山 *LST* 变化趋势空间分布

Fig. 6　Trend spatial distribution of *LST* in Qilian Mountains

表 3　各植被类型 *LST* 及变化率统计

Tab. 3　*LST* and variety rate of various vegetation types

年季	草甸		耕地		荒漠		林地	
	平均 *LST* / ℃	变化率 / ℃ · (10 a)$^{-1}$	平均 *LST* / ℃	变化率 / ℃ · (10 a)$^{-1}$	平均 *LST* / ℃	变化率 / ℃ · (10 a)$^{-1}$	平均 *LST* / ℃	变化率 / ℃ · (10 a)$^{-1}$
春季	23.03	-0.03	30.95	0.08	25.03	0.03	16.42	-0.04
夏季	25.91	0.10	32.33	0.16	30.81	0.16	22.94	0.10
秋季	15.84	0.18	22.00	0.18	17.75	0.12	11.98	0.20
冬季	5.17	0.04	11.16	-0.01	3.08	0.05	-0.57	0.06
年	17.49	0.08	24.11	0.10	19.16	0.09	12.69	0.08

4 讨 论

4.1 *NDVI* 对 *LST* 的影响

植被对气候变化存在显著的反馈关系,祁连山 *LST* 与 *NDVI* 在春、秋、冬季以正相关为主,年和夏季以负相关为主。年 *LST* 与 *NDVI* 相关性分布与夏季相似,极显著负相关区域主要分布在青海湖、冷龙岭、乌鞘岭等地区,极显著正相关区域主要集中在大通河、托来山等祁连山中部地区。夏季 *LST* 与 *NDVI* 之间负向关系明显高于其他季节,负相关区域占总面积的 71.09%,其中极显著负相关区域占 25.45%,这可能与夏季祁连山植被覆盖状态变好有关[28]。春季和秋季 *LST* 与 *NDVI* 正向关系在高海拔地区尤为显著,沿山脉分布。刘旻霞等[29]认为在年均温和辐射热量较低的亚高寒地带,水热条件是限制植被生长的主要因素,且林区植被对气温变化更为敏感 。冬季 *LST* 与 *NDVI* 正向关系最为显著,全区 95.76% 的地区 *LST* 与 *NDVI* 呈正相关。植被的降温作用一定程度上是因为叶面的水分含量,干枯的植被并不具有对地表的降温作用[24]。

植被对 *LST* 变化的影响不仅与植被覆盖度有关,还跟植被疏密程度、植被类型等有一定的联系。为了分析不同植被类型下 *NDVI* 对 *LST* 的影响,计算了月 *LST* 与 4 种植被类型月 *NDVI* 的相关系数,结果(表 4)表明,草甸,荒漠和林地 *NDVI* 与 *LST* 以正相关为主,而耕地 *NDVI* 与 *LST* 以负相关为主,说明耕地对 *LST* 上升具有更强的抑制作用。对于月 *LST* 而言,相关系数存在一定的季节变化,在 7 ~ 9 月,草甸,林地 *NDVI* 与 *LST* 相关性明显减小,呈不显著正相关,耕地和荒漠 *LST* 与 *NDVI* 负相关系数显著增大,说明夏季植被覆盖增大可有效抑制 *LST* 的上升。值得注意的是,荒漠 *NDVI* 与 *LST* 的相关系数,从 10 月极显著正相关,相关系数达 0.815,到次年 6 ~ 8 月相关系数明显减小至负相关,虽然这种变化在草甸和林地上也有体现,但在荒漠地区这种相关性的变化特征更为明显,可以推测植被稀疏区植被覆盖对 *LST* 的调控作用更强一些[30]。

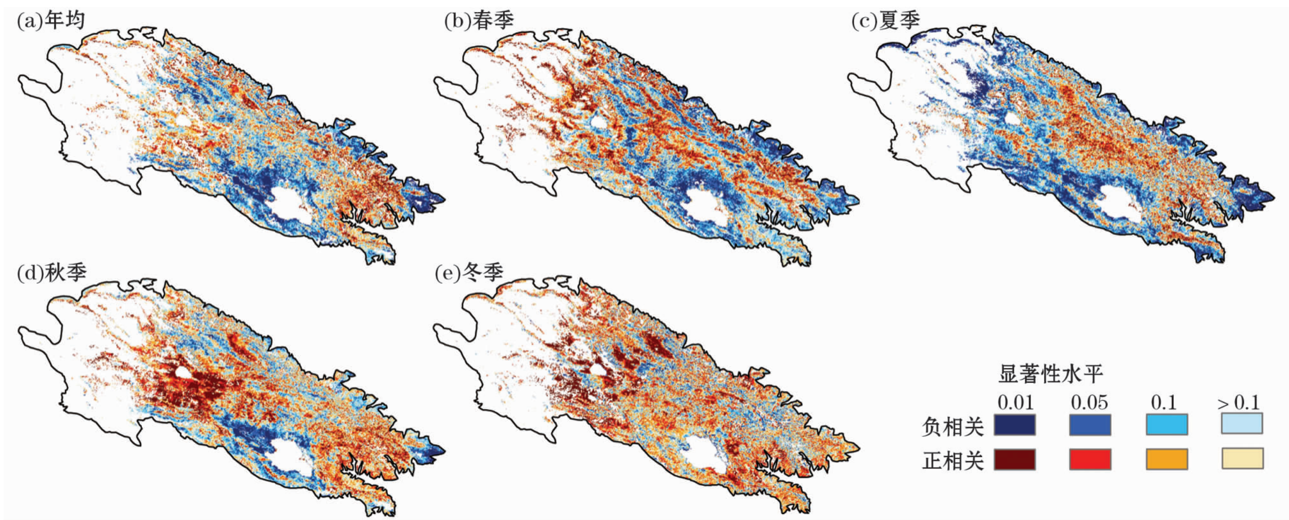


图 7 祁连山 *LST* 与 *NDVI* 相关性空间分布

Fig. 7 *LST* and *NDVI* correlation spatial distribution in Qilian Mountains

表 4 不同植被类型月 *LST* 与 *NDVI* 的相关性

Tab. 4 Correlation between monthly *LST* and *NDVI* of different vegetation types

植被类型	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
草甸	0.680**	0.699**	0.683**	0.457**	0.432**	0.299**	0.087	0.114	0.378**	0.737**	0.698**	0.653**
耕地	0.115	0.018	-0.248**	-0.385**	-0.505**	-0.624**	-0.737**	-0.711**	-0.643**	-0.403**	-0.176**	-0.880
荒漠	0.640**	0.583**	0.332**	0.151**	0.163**	-0.138	-0.149	-0.034	0.271*	0.815**	0.738**	0.647**
林地	0.523**	0.550**	0.491**	0.530**	0.619**	0.508**	0.366**	0.320**	0.543**	0.670**	0.625**	0.535**

注: * 为通过 $p < 0.05$ 显著性检验; ** 为通过 $p < 0.01$ 显著性检验

表 5　不同植被类型月 *LST* 与海拔的相关性

Tab. 5　Correlation between monthly *LST* and altitude of different vegetation types

植被类型	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
草甸	-0.697**	-0.690**	-0.600**	-0.625**	-0.753**	-0.694**	-0.527**	-0.473**	-0.661**	-0.711**	-0.675**	-0.663**
耕地	0.024	0.035	0.174	-0.130	-0.094	-0.162	-0.274*	-0.263**	-0.320**	-0.175	0.001	0.047
荒漠	-0.849**	-0.846**	-0.848**	-0.847**	-0.904**	-0.911**	-0.900**	-0.880**	-0.878**	-0.897**	-0.875**	-0.860**
林地	-0.789**	-0.769**	-0.698**	-0.734**	-0.829**	-0.770**	-0.648**	-0.605**	-0.738**	-0.771**	-0.772**	-0.773**

注：* 为通过 $p<0.05$ 显著性检验；**为通过 $p<0.01$ 显著性检验

4.2　海拔对 *LST* 的影响

祁连山 *LST* 不仅与植被状况有关，而且与海拔等地形因子有着密切的联系。祁连山地表热条件的时空变异性及其与海拔及植被类型之间的复杂关系和年内变化有待进一步讨论。图 8 给出了 4 种植被覆盖类型在海拔上的分布及对应的月均 *LST*，同时还计算了不同植被类型下月 *LST* 与海拔之间的相互关系，证实了 *LST* 和海拔之间存在显著的相关性，同时还反映了祁连山植被垂直组织结构及其年内 *LST* 的变化状态。显然，海拔是祁连山 *LST* 变化的重要影响因子，各月海拔与 *LST* 之间均为极显著负相关，相关系数冬季最高，7 月、8 月最低。由于夏季低海拔地区植被覆盖的增加和云层覆盖的变化，地表与大气之间的能量通量交换发挥作用，使得 *LST* 与地形的相关性显著降低[31]。

当考虑到植被类型时，草甸、耕地、荒漠和林地地区 *LST* 年内变化具有明显的季节性，在 7 月份达到最高值，其中海拔 3 500 m 左右的荒漠地区月 *LST* 达到 42.5 ℃的极高值。在海拔 2 500 ~ 3 500 m之间，耕地和荒漠地区的 *LST* 存在较大的年内异质性。5 月，荒漠地区 *LST* 快速上升至耕地以上，成为中低海拔地区夏季 *LST* 最高的植被覆盖类型，这与稀疏植被区土壤和冠层温度的组合有关，荒漠地区土壤水分具有更大的变异性，从而导致在稀疏的非林区地带 *LST* 变化范围更大[26]。此外，我们还分析了 4 种植被类型月 *LST* 与海拔的相互关系（表 5），各植被覆盖 *LST* 对海拔的响应程度依次为荒漠 > 林地 > 草甸 > 耕地。海拔对荒漠 *LST* 的影响远大于其他几种植被类型。海拔对耕地 *LST* 影响极小，除夏季外，其余月份相关性均不显著，相比于其他植被类型的广泛分布，祁连山耕地多分布在 2 000 m 以下的低海拔河谷平原地带，海拔对其 *LST* 变化影响较小。

5　结 论

利用 2000—2017 年间祁连山 MODIS *LST* 及 MODIS *NDVI* 数据，分析了祁连山 *LST* 空间分布特征及时空变化规律，讨论了不同植被类型下，*LST* 与 *NDVI*，*LST* 与海拔的相互关系。得出以下结论：

（1）MODIS *LST* 产品与祁连山 13 个气象站实测 *LST* 相关性显著，可有效应用于祁连山 *LST* 时空分布特征的研究。

（2）祁连山 *LST* 时间序列呈“上升—下降—上升—下降”的波动变化特征，整体呈小幅上升趋势，变化率为 0.17 ℃·$(10\ a)^{-1}$。经历了 2000—2003 年〔1.83 ℃·$(10\ a)^{-1}$〕和 2004—2017〔0.14 ℃·$(10\ a)^{-1}$〕两个上升期；空间上年均 *LST* 呈西北轻微降低东南显著升高的变化趋势，极显著上升的面积（14.89%）远大于极显著下降的面积（0.90%）；4 个季节 *LST* 均呈上升趋势，其中冬季增温趋势最为显著，春季下降区域占比最大。春季和冬季 *LST* 上升区域主要分布在东南部的高温区，而秋季增温区域则集中在西南部的低温区。

（3）*NDVI* 对 *LST* 变化影响显著，年均 *LST* 与 *NDVI* 呈负相关，显著相关区域占 22.56%。春、秋、冬季 *NDVI* 与 *LST* 以正相关为主，夏季植被对 *LST* 的抑制作用较显著；不同植被类型对 *LST* 的响应有所差异，低海拔地区耕地对 *LST* 的负向作用最明显，稀疏植被区的植被对 *LST* 的影响更大。而高海拔林区 *LST* 是限制植被生长的主要因素，*LST* 与 *NDVI* 的正相关关系显著。

（4）*LST* 与海拔之间呈极显著负相关，但这种关系在夏季因植被覆盖等因素的变化而明显减弱。荒漠地区 *LST* 对海拔的响应最为强烈，且荒漠 *LST* 在海拔 2 500 ~ 3 500 m 之间具有更强的年内变异性，这种特征主要是由土壤水分的差异性引起的。

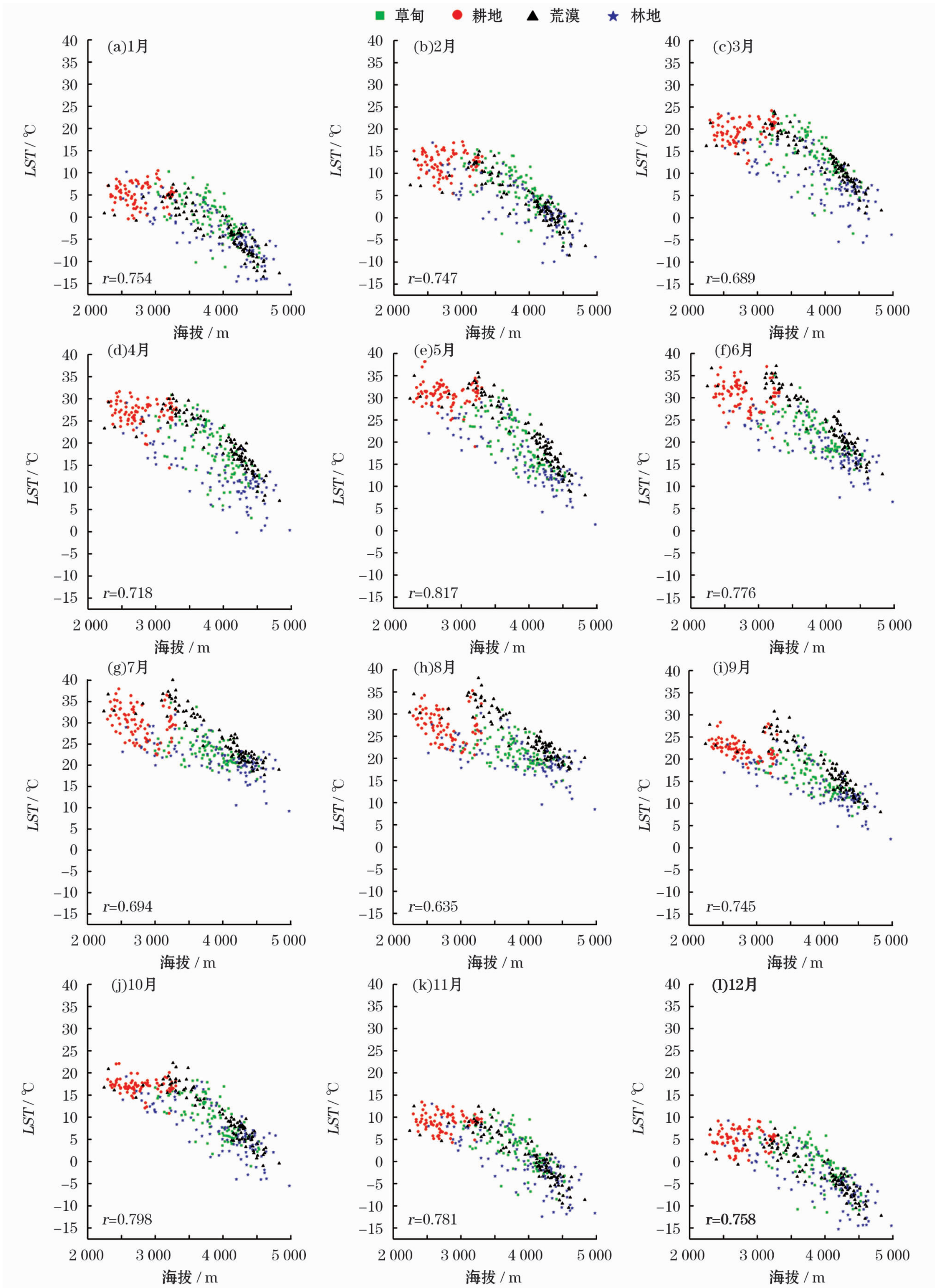


图 8　4 种植被类型月 *LST* 在海拔上的分布

Fig. 8　*LST* distribution of vegetation types at different altitude

参考文献(References)

[1] FREY C,CLAUDIA K. Land-surface temperature dynamics in the upper Mekong basin derived from MODIS time series[J]. International Journal of Remote Sensing,2014,35(8):2780-2798.

[2] 薛亚永,梁海斌,张园,等. 黄土高原地表温度变化的时空格局[J]. 地球与环境,2017,45(5):500-507. [XUE Yayong, LIANG Haibin,ZHANG Yuan,et al. Spatial and temporal variations of land surface temperature of the Loess Plateau[J]. Earth and Environment,2017,45(5):500-507.]

[3] YAN Denghua,XU Ting,GIRMA Able,et al. Regional correlation between precipitation and vegetation in the Huang-Huai-Hai River Basin,China[J]. Water,2017,9(8):557-572.

[4] SONG Yi,JIN Long,WANG Haibo. Vegetation changes along the Qinghai-Tibet Plateau engineering corridor since 2000 induced by climate change and human activities [J]. Remote Sensing,2018, 10(2):95-116.

[5] 乔丽,吴林荣,张高健. 中国近 50 a 地表温度时空变化特征分析[J]. 水土保持通报,2015, 35(5):323-326. [QIAO Li,WU Linrong,ZHANG Gaojian. Temporal and spatial changes of land surface temperature in China in recent 50 years[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2015,35(5):323-326.]

[6] 冉津江,季明霞,黄建平,等. 中国干旱半干旱地区的冷季快速增温[J]. 高原气象,2014, 33(4):947-956. [RAN Jinjiang,JI Mingxia,HUANG Jianpin,et al. Enhanced cold season warming in arid and semi-arid regions of China [J]. Plateau Meteorology, 2014,33(4):947-956.]

[7] 黄清瀚,陈海山,华文剑. 近 30 a 来中国干旱生态区增暖放大现象及其与植被覆盖的联系[J]. 气候与环境研究,2018,23(1):72-82. [HUANG Qinghan, CHEN Haishan, HUA Wenjian. Stronger warming amplification over arid ecoregions and its relationship to vegetation cover in China since 1982 [J]. Climatic and Environmental Research,2018,23(1):72-82.]

[8] ZHOU Liming,CHEN Haishan,HUA Wenjian,et al. Mechanisms for stronger warming over drier ecoregions observed since 1979 [J]. Springer Berlin Heidelberg,2016,47(9):2955-2974.

[9] 王明娜. 21 世纪初中国北方半干旱区土地利用变化对地表温度的影响[J]. 气候与环境研究 2016,21(1):65-77. [WANG Mingna. Impact of land use and cover change in the semi-arid regions of China on the temperature in the early 21st century[J]. Climatic and Environmental Research,2016,21(1):65-77.]

[10] 热伊莱·卡得尔,玉苏甫·买买提,玉素甫江·如素力,等. 伊犁河谷 2001—2014 年地表温度时空分异特征[J]. 中国沙漠,2018,38(3):196-203. [KADEER Reyilai, MAIMAITI Yusufu, RUSULI Yusufujiang,et al. Spatial-temporal variation of land surface temperature in the Ili River Valley during 2001-2014[J]. Journal of Desert Research,2018,38(3):196-203.]

[11] 武正丽,贾文雄,赵珍,等. 2000—2012 年祁连山植被覆盖变化及其与气候因子的相关性[J]. 干旱区地理,2015,38(6):1241-1252. [WU Zhengli,JIA Wenxiong,ZHAO Zhen,et al. Spatial-temporal variations of vegetation and its correlation with climatic factors in Qilian Mountains from 2000 to 2012[J]. Arid Land Geography,2015,38(6):1241-1252.]

[12] 巩宁刚,孙美平,闫露霏,等. 1979—2016 年祁连山地区大气水汽含量时空特征及其与降水的关系[J]. 干旱区地理,2017,40(4):762-771. [GONG Ninggang,SUN Meiping,YAN Lulu,et al. Temporal and spatial characteristics of atmospheric water vapor and its relationship with precipitation in Qilian Mountains during 1979-2016[J]. Arid Land Geography,2017,40(4):762-771.]

[13] 徐浩杰,杨太保,曾彪. 2000—2010 年祁连山植被 MODIS *NDVI* 的时空变化及影响因素[J]. 干旱区资源与环境,2012,26(11):87-91. [XU Haojie,YANG Taibao,ZENG Biao. Spatial-temporal changes of vegetation in Qilian Mountains from 2000 to 2010 based on MODIS *NDVI* data and its affecting factors[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment,2012,26(11):87-91.]

[14] 蒋友严,杜文涛,黄进,等. 2000—2015 年祁连山植被变化分析[J]. 冰川冻土,2017,39(5):1130-1136. [JIANG Youyan,DU Wentao,HUANG Jin,et al. Analysis of vegetation changes in the Qilian Mountains during 2000-2015[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2017,39(5):1130-1136.]

[15] 贾文雄,赵珍,俎佳星,等. 祁连山不同植被类型的物候变化及其对气候的响应[J]. 生态学报,2016,36(23):7826-7840. [JIA Wenxiong,ZHAO Zhen,ZU Jiaxing,et al. Phenological variation in different vegetation types and their response to climate change in the Qilian Mountains,China,1982-2014[J]. Acta Ecologica Sinica,2016,36(23):7826-7840.]

[16] 戴声佩,张勃,王海军,等. 1999—2007 年祁连山区植被指数时空变化[J]. 干旱区研究,2010,27(4):585-591. [DAI Shengpei,ZHANG Bo,WANG Haijun,et al. Spatial-temporal variation of vegetation *NDVI* in the Qilian Mountains during the period from 1999 to 2007[J]. Arid Zone Research,2010,27(4):585-591.]

[17] 刘亚荣,贾文雄,黄玫,等. 近 51a 来祁连山植被净初级生产力对气候变化的响应[J]. 西北植物学报,2015,35(3):601-607. [LIU Yarong,JIA Wenxiong,HUANG Mei,et al. Response of vegetation net primary productivity to climate change in the Qilian Mountains since recent 51years[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica,2015,35(3):601-607.]

[18] 王强,张勃,戴声佩,等. 三北防护林工程区植被覆盖变化与影响因子分析[J]. 中国环境科学,2012,32(7):1302-1308. [WANG Qiang,ZHANG Bo,DAI Shengpei,et al. Analysis of the

vegetation cover change and relationship with factors in the Three-North Shelter Forest Program[J]. China Environmental Science, 2012,32(7):1320－1308.]

[19] GUO Xiaoyi,ZHANG Hongyan,WANG Yeqiao,et al. Comparison of the spatio-temporal dynamics of vegetation between the Changbai Mountains of eastern Eurasia and the Appalachian Mountains of eastern North America[J]. Journal of Mountain Science,2018,15(1):1－12.

[20] 马磊,闫浩文,何毅,等. 2001—2015 年喜马拉雅南麓地区植被变化遥感监测[J]. 干旱区地理,2017,40(2):405－414. [MA Lei,YAN Haowen,HE Yi,et al. Vegetation changes in south Himalayas areas based on remote sensing monitoring during 2001－2015[J]. Arid Land Geography,2017,40(2):405－414.]

[21] HU Ling,FAN Wenjie,REN Huazhong,et al. Spatiotemporal dynamics in vegetation GPP over the great Khingan Mountains using GLASS products from 1982 to 2015[J]. Remote Sensing, 2018,10(3):488－500.

[22] 曹广超,付建新,李玲琴,等. 1960—2014 年祁连山南坡及其附近地区气温时空变化特征[J]. 水土保持研究,2018,25(3):88－96. [CAO Guangchao,FU Jianxin,LI Lingqin, et al. Analysis on temporal and spatial variation characteristics of air temperature in the south slope of Qilian Mountains and its nearby regions during the period from 1960 to 2014[J]. Research of Soil and Water Conservation,2018,25(3):88－96.]

[23] 商沙沙,廉丽姝,马婷,等. 近 54 a 中国西北地区气温和降水的时空变化特征[J]. 干旱区研究,2018,35(1):68－76. [SHANG Shasha,LIAN Lishu,MA Ting,et al. Spatiotemporal variation of temperature and precipitation in northwest China in recent 54 years[J]. Arid Zone Research,2018,35(1):68－76.]

[24] 李斌,王慧敏,秦明周,等. *NDVI*、NDMI 与地表温度关系的对比研究[J]. 地理科学进展, 2017,36(5):585－596. [LI Bin, WANG Huimin, QIN Mingzhou, et al. Comparative study on the correlations between *NDVI*, NDMI and *LST*[J]. Progress in Geography,2017,36(5):585－596.]

[25] 邱丽莎,张立峰,何毅,等. 2000—2017 年祁连山植被动态变化遥感监测[J]. 遥感信息,2019,34(4):97－107. [QIU Lisha, ZHANG Lifeng,HE Yi,et al. Vegetation dynamic change of remote sensing monitoring in Qilian Mountain in recent years[J]. Remote Sensing Information,2019,34(4):97－107.]

[26] 付建新,曹广超,李玲琴,等. 1960—2014 年祁连山中东段及其附近地区气温时空变化特征[J]. 干旱区研究,2018,35(3):549－561. [FU Jianxin,CAO Guangchao,LI Lingqin,et al. Spatiotemporal variation of air temperature in the middle and eastern parts of the Qilian Mountains and the nearby regions during the period of 1960－2014[J]. Arid Zone Research,2018,35(3):549－561.]

[27] 屈创,马金辉,夏燕秋,等. 基于 MODIS 数据的石羊河流域地表温度空间分布[J]. 干旱区地理,2014,37(1):125－133. [QU Chuang,MA Jinhui,XIA Yanqiu,et al. Spatial distribution of land surface temperature retrieved from MODIS data in Shiyang River Basin[J]. Arid Land Geography,2014,37(1):125－133.]

[28] 周婷,张寅生,高海峰,等. 青藏高原高寒草地植被指数变化与地表温度的相互关系[J]. 冰川冻土,2015,37(1):58－69. [ZHOU Ting,ZHANG Yinsheng,GAO Haifeng,et al. Relationship between vegetation index and ground surface temperature on the Tibetan Plateau alpine grassland[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2015,37(1):58－69.]

[29] 刘旻霞,赵瑞东,邵鹏,等. 近 15 a 黄土高原植被覆盖时空变化及驱动力分析[J]. 干旱区地理,2018,41(1):99－108. [LIU Minxia,ZHAO Ruidong,SHAO Peng,et al. Temporal and spatial variation of vegetation coverage and its driving forces in the Loess Plateau from 2001 to 2015[J]. Arid Land Geography,2018, 41(1):99－108.]

[30] 刘振元,张杰,陈立. 青藏高原植被退化对高原及周边地区大气环流的影响[J]. 生态学报,2018,38(1):132－142. [LIU Zhenyuan,ZHANG Jie,CHEN Li. Effects of vegetation degradation on atmospheric circulation over the Tibetan Plateau and its surrounding areas[J]. Acta Ecologica Sinica,2018,38(1):132－142.]

[31] DANIELA S,MASSIMO A,PIETRO A B. Seasonality of MODIS *LST* over southern Italy and correlation with land cover, topography and solar radiation[J]. European Journal of Remote Sensing, 2014,47(1):133－152.

Spatiotemporal variation characteristics and influence factors of MODIS *LST* in Qilian Mountain

QIU Li-sha[1,2,3], HE Yi[1,2,3], ZHANG Li-feng[1,2,3], WANG Wen-hui[1,2,3], TANG Yuan-wei[1,2,3]

(1 *Faculty of Geomatics, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou* 730700, *Gansu, China*;
2 *National-Local Joint Engineering Research Center of Technologies and Applications for National Geographic State Monitoring, Lanzhou* 730700, *Gansu, China*;
3 *Gansu Provincial Engineering Laboratory for National Geographic State Monitoring, Lanzhou* 730700, *Gansu, China*)

Abstract: Land surface temperature (*LST*) is an important variable in the surface energy budget, significantly affecting the global agriculture, natural disasters, hydrology, and ecological environment. With global climate change, quantitative research on *LST* and its related factors become critical in both regional and global scales. The Qilian Mountains in Qinghai and Gansu Province, China, as the boundary between the Qinghai-Tibetan Plateau and Northern Hinterland, is influenced by the continental climate and the climate of the Qinghai-Tibetan Plateau. It belongs to the temperate semi-arid climate zone and is an important geographical and climatic boundary line in China. The study of *LST* in the Qilian Mountains is essential for understanding the hydrothermal cycle in the northwest and improving the fragile ecological environment. The climate pattern, vegetation, and different land-use of the Qilian Mountains have been studied comprehensively. However, the spatiotemporal variability characteristics of *LST* and its response mode to terrain are not yet clear. Besides, the impact of different vegetation types on *LST* changes need to be discussed. Based on the MODIS *LST* data from 2000 to 2017, this study used a linear trend method to analyze the temporal and spatial variation of *LST* in the Qilian Mountains and used Pearson correlation analysis to discuss the regulation of *LST* by different types of vegetation and the influence of altitude on its change. The results are as follows: (1) the accuracy of MODIS *LST* products can meet the requirements of time-space variation analysis of surface temperature in the Qilian Mountains. (2) the Qilian Mountains *LST* increased at a rate of 0.17 ℃·$(10\ a)^{-1}$, with two rising periods in 2000 – 2003 (1.83 ℃·$(10\ a)^{-1}$) and 2004 – 2017 (0.14 ℃·$(10\ a)^{-1}$). The annual average *LST* increased from South-West to North-East, and the significant rising area accounts for 77.26% of the total area. The extremely significant rising areas were mainly distributed in the middle and low altitudes below 3500 m. In addition, the winter change rate was the highest (0.22 ℃·$(10\ a)^{-1}$), and the warmer area reached 98.23%. The winter warming had the greatest contribution to the increase of *LST* in the Qilian Mountains. (3) vegetation had a significant impact on *LST* changes, cultivated lands had a better inhibitory effect on *LST* rise, and vegetation in the desert had a stronger regulatory effect on *LST*. Except for summer, the NDVI and *LST* were positively correlated in the rest of the season, and the positively correlated areas were mainly concentrated in the high-altitude forest land. (4) the effect of altitude on *LST* was significantly weak during the summer due to conditions such as vegetation cover changes. The *LST* in the desert showed the strongest response to altitude, with strong annual fluctuations between 2500 and 3500 m. Meanwhile, vegetation degradation and human activities at low and medium altitudes may be the main factors accelerating the increase in *LST*.

Key words: MODIS *LST*; MODIS *NDVI*; vegetation type; Qilian mountain